

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de
08/12/2025

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until
December 8, 2025

EMANUEL RANGEL SPADIM

**ANÁLISE MULTIVARIADA DO FUNCIONAMENTO DE UMA
CALDEIRA MISTA A BIOMASSA FLORESTAL PARA CONTROLE DO
PROCESSO DE COMBUSTÃO**

Botucatu

2023

EMANUEL RANGEL SPADIM

**ANÁLISE MULTIVARIADA DO FUNCIONAMENTO DE UMA
CALDEIRA MISTA A BIOMASSA FLORESTAL PARA CONTROLE DO
PROCESSO DE COMBUSTÃO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu para obtenção do título de Doutor em Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Saulo P. S. Guerra

Botucatu

2023

S732a

Spadim, Emanuel Rangel

Análise multivariada do funcionamento de uma caldeira mista a biomassa florestal para controle do processo de combustão / Emanuel Rangel Spadim. -- Botucatu, 2023

70 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra

1. Biomassa. 2. Energia Renovável. 3. Carta de controle. 4. Correlação. 5. Estatística Multivariada. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

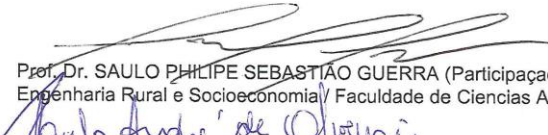
Título:

ANÁLISE MULTIVARIADA DO FUNCIONAMENTO DE UMA CALDEIRA MISTA A BIOMASSA FLORESTAL PARA O CONTROLE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO

AUTOR: EMANUEL RANGEL SPADIM

ORIENTADOR: SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

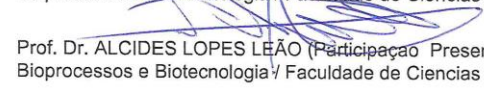
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP


Prof. Dr. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA (Participação Presencial)
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu


Prof. Dr. EDER APARECIDO GARCIA (Participação Presencial)
/ Faculdade de Tecnologia de Ourinhos


Prof. Dr. SÉRGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas - Unesp


Prof. Dr. ALCIDES LOPES LEÃO (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas - Unesp/ Câmpus de Botucatu

Botucatu, 08 de dezembro de 2023.

Aos meus pais,
Mario e Maria das Graças,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mario e Maria das Graças, pela constante e incondicional ajuda e atenção em todos os momentos da minha vida.

À Gabriela Spadim e ao Wellington Pauletti, pela amizade e boa vontade nas tantas horas de atenção e trabalho a mim dedicados.

À Letícia Spadim, pela amizade e carinho com o titio.

Ao João Lorenço pela amizade.

Ao Roberto Trevisan e à Lourdes Spadim, pela amizade, ajudas, incentivo e exemplo.

Ao meu orientador, Saulo Guerra, pela oportunidade, pela ajuda e incentivo desde o início deste trabalho, e pela disponibilidade e atenção em todos os momentos.

À Maura Esperancini e ao Zacharias de Barros, pela oportunidade.

Ao Sérgio Rodrigues, pelo exemplo, incentivo, didática e ajuda técnica.

À Letícia Vieira, pelo carinho e paciência, por todos os bons momentos de convivência e pelo exemplo e incentivo ao início na vida acadêmica que, com certeza, nos engrandece e faz render bons frutos.

À Marcela Arthur, pelo exemplo de dedicação, pela grande amizade que fizemos neste período, pelas horas de boas conversas e pelo incentivo constante em tudo o que eu me propunha a fazer.

À Lívia Campos, pela grande amizade e carinho, pelo exemplo, pela ajuda técnica e parceria de sempre.

Ao Fábio Lopes, que de muito distante manteve firme a amizade e a troca de experiências sobre o cotidiano da vida por aqui e por lá.

Ao Marcelo Denadai, pela amizade e pela parceria de sempre.

Ao Humberto Eufrade Junior e à Letícia Oda, meus grandes amigos, sempre tão hospitaleiros e gentis comigo.

Ao Guilherme Oguri pela amizade e exemplo

Ao Murilo Caliente, pela amizade e opiniões francas.

À Beatriz Zerbinato, pela amizade, pela presteza e pela disposição para ouvir sobre os contratempos do dia a dia.

À Natália Arruda, pela ajuda neste trabalho e em todos os outros do dia a dia.

À Josiane Alves que, com toda a diligência em seu trabalho no departamento, cuidou tão bem de todos nós por todo esse período.

Ao Gabriel Cassini e ao Danilo de Melo, pela amizade, parceria e pela disposição infinita, ao Miguel Pascucci e Kléber Lanças pela amizade, ao Aldir Carpes pelo incentivo na vida acadêmica, à Julia Faria e Rafael Soler pela amizade, a Giovani Capriolli, Diego Borges, Lavínia Liberato e Amanda Castanho pela parceria no dia a dia, ao João Marcos de Souza, pela amizade e incentivos, ao Vicente Cornago pela amizade e à Ana Lúcia Kempinas pela competência no trabalho e pela boa vontade e gentileza.

A todos os amigos do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, em especial a Marcos Tavares, Fabiana Araújo e Mariano de Viveiros.

Ao Flávio Firmino, que prestou um apoio técnico preciso e essencial durante toda a execução deste trabalho, da idealização aos momentos finais.

Ao José Simões e Danila Cruz, que abriram as portas e deram suporte para a execução deste trabalho.

Ao Gilson Silésio, pelo apoio técnico.

A todos que, de alguma forma, contribuíram com o desenvolvimento desta tese.

RESUMO

Com a forte pressão por uma mudança nas matrizes energéticas em direção ao desenvolvimento sustentável, a energia de biomassa é uma alternativa altamente viável por estar apoiada nas bases econômica, social e ambiental que o pressupõem. O entendimento dos eventos envolvidos na transformação dessa energia pode aumentar a sua eficiência. O estudo teve como objetivo mostrar o comportamento de uma caldeira submetida a diferentes combustíveis usando estatística multivariada para evidenciar possíveis rotas de ação na melhoria dos seus processos. Foram aplicadas cartas de controle multivariadas aos dados coletados durante a operação de uma caldeira a biomassa submetida a diferentes combustíveis (C1 – cavaco de eucalipto, C2 – mistura de 60% cavaco de eucalipto e 40% casca de eucalipto) e observou-se seu reflexo nas variáveis obtidas pelo supervisor do equipamento. Os dados também foram submetidos a uma análise de componentes principais (PCA) combinada à estatística T^2 de Hotelling. Uma carta de controle com gráfico interativo foi desenvolvida e usada como ferramenta para inspeção visual do comportamento das variáveis. Do ponto de vista das cartas de controle, o combustível C2 apresentou maior instabilidade, com maior número de pontos extrapolando o limite da estatística T^2 de Hotelling e maior distribuição na contribuição das variáveis para saída de controle do processo. A variável pressão da fornalha foi a que teve maior mudança de comportamento, sendo a terceira maior contribuinte para as saídas de controle no uso do combustível C2 e a que menos contribuiu no combustível C1. As quatro variáveis relacionadas à gestão da água (temperatura, pressão, vazão e nível da água) tiveram grande participação na saída de controle no uso do combustível C1, tendo 48,9% de contribuição, contra 41,5% no uso do C2. A PCA demonstrou dispersão maior dos pontos no gráfico de escores quando no uso do combustível C2, denotando maior variabilidade nessa condição. Ainda assim, de forma geral, o comportamento das direções dos vetores de variáveis e dos pontos com estatística T^2 de Hotelling extrapolada foram similares. A relação entre os pontos extrapolados e as dimensões das variáveis puderam ser analisadas do ponto de vista da variância dos dados.

Palavras-chave: Estatística multivariada. Biomassa. Caldeira. Carta de controle. T^2 de Hotelling. PCA.

ABSTRACT

With the intense pressure for a change in the energy matrixes towards sustainable development, biomass emerges as a highly viable alternative because it is supported by the economic, social, and environmental bases that presuppose it. Understanding the events involved in transforming this energy can increase its efficiency. This work aimed to show the behavior of a boiler subjected to different fuels using multivariate statistical techniques to highlight possible courses of action to improve its processes. Multivariate control charts with Hotelling's T^2 statistics were applied to the data collected during the operation of a biomass boiler subjected to different fuels (C1 - eucalyptus chips, C2 - a mixture of 60% eucalyptus chips and 40% eucalyptus bark). Their reflection was observed in the variables obtained by the equipment supervisory. The data were also submitted to a principal component analysis (PCA) combined with Hotelling's T^2 statistics. A control chart with an interactive graph was developed and used to inspect the variables' behavior visually. From the point of view of the control charts, the C2 fuel presented greater instability, with a more significant number of points extrapolating the limit of Hotelling's T^2 statistic and greater distribution in the contribution of the variables to the process control output. The furnace pressure showed the greater behavior changing, as it was the third contributor for the upper control limit extrapolation when using C2 fuel and the least one to C1 fuel. The four variables related to water management (temperature, pressure, flow, and level) shown great contribution to the control limit extrapolation in the C1 fuel use, having a 48.9% contribution compared to 41.5% in the C2 use. The PCA showed a slightly greater dispersion of the points in the score plot when using C2 fuel, denoting more significant variability under this condition. Even so, in general, the behavior of the directions of the variable vectors and the points with extrapolated Hotelling's T^2 statistics were similar. The relationship between the points beyond the control limit and the variables' dimensions could be analyzed broadly.

Keywords: Multivariate statistics. Biomass. Boiler. Control chart. Hotelling's T^2 . PCA.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
REVISÃO DE LITERATURA	18
USO DE BIOMASSA EM CALDEIRAS.....	18
ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	19
VARIÁVEIS ANALISADAS NO SUPERVISÓRIO DA CALDEIRA	19
CARTAS DE CONTROLE POR ESTATÍSTICA T^2 DE HOTELLING	20
CONTROLE ESTATÍSTICO EM CALDEIRAS.....	21
CARACTERIZAÇÃO PELA ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA DA BIOMASSA	22
CAPÍTULO 1 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS E ESTATÍSTICA T^2 DE HOTELLING PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE UMA CALDEIRA MISTA A BIOMASSA SUBMETIDA A DIFERENTES COMBUSTÍVEIS	24
1.1 INTRODUÇÃO.....	24
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	26
1.2.1 Amostragem e tratamento dos dados do processo	26
1.2.2 Análise estatística.....	27
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
1.4 CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO 2 APLICAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE T^2 DE HOTELLING PARA CONTROLE ESTATÍSTICO DE UMA CALDEIRA MISTA A BIOMASSA	43
2.1 INTRODUÇÃO.....	43
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.2.1 Local e condições de execução da pesquisa.....	45
2.2.2 Amostragem e caracterização do combustível	45
2.2.3 Amostragem e tratamento dos dados de processo	46
2.2.4 Análise estatística	47
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
2.4 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	61
CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
REFERÊNCIAS	67

INTRODUÇÃO GERAL

Energia e desenvolvimento econômico estão diretamente relacionados e fazem da segurança energética e seus impactos socioeconômicos um assunto amplamente abordado no mundo, onde se fortalece um discurso global pressionando a transição de um sistema baseado em combustível fóssil para a energia renovável (Razi; Dincer, 2022).

Diante das previsões de aumento mundial de demanda energética e da conscientização do uso sustentável da energia, estudos sugerem maior atenção para este tema (Van Ruijven; De Cian; Sue Wing, 2019). Paralelo à sustentabilidade dos meios de fornecimento de energia, o possível esgotamento dos combustíveis fósseis nos próximos anos impulsiona a busca por novas formas de obtenção energia (Ali *et al.*, 2019).

A biomassa, que consiste em toda matéria animal ou vegetal, é uma fonte de energia considerada limpa, e tem esta última como a energia renovável mais abundante e promissora substituta do petróleo a ser usada como matéria prima em uma economia sustentável (Woiciechowski *et al.*, 2020). Milhões de toneladas de biomassa são geradas em todo o sistema agrícola e florestal mundial, e o uso desta matéria orgânica como combustível é uma forma razoável de ampliar o fornecimento de energia para suprir a demanda crescente no planeta (Boro *et al.*, 2022).

Nesse contexto, é razoável dispendir atenção ao aprimoramento dos processos de produção que fazem uso da biomassa agrícola e florestal como fonte de energia. A alta disponibilidade de tal combustível e a sua capacidade de aproveitamento faz oportuno e necessário o estudo das diversas etapas inerentes ao processamento deste material para torná-lo mais eficiente (Østergaard *et al.*, 2020). O Brasil apresenta um potencial significativo para elevar a produção de biomassa de forma sustentável, com capacidade de aumentar a participação de biocombustíveis no mercado doméstico e internacional (EPE, 2023).

Dentre os tipos de biomassa, a proveniente da madeira é muito utilizada na indústria em geral, sendo frequente nas plantas de produção de papel e celulose, que empregam cada vez mais os resíduos desta matéria prima - e em certas situações, até a própria matéria prima em sua forma mais nobre – como fonte primária de energia térmica e elétrica (Costa; Tarelho; Sobrinho, 2019), fato também presente na indústria de corte e processamento de madeira, podendo gerar um volume de resíduo

equivalente a 27% da massa de madeira processada (Greinert; Mrówczyńska; Szefer, 2019).

O empenho pela correta condução dos processos industriais caminha ao lado da busca pela sustentabilidade, incorrendo na produção industrial que gera mais valores econômicos com menos impacto no meio ambiente e na sociedade, confirmam Santos *et al.* (2021), visto que a eficiência nos processos de produção é aliada do desenvolvimento sustentável, tocando em dois dos pilares da sustentabilidade ao se relacionar diretamente com sua viabilidade econômica e ao tornar essas atividades menos agressivas ao meio ambiente.

Uma forma de aproveitar a energia da biomassa é o seu uso em fornalhas de caldeiras industriais, que são máquinas térmicas que podem ser alimentadas por este material e produzem vapor, funcionando como um condutor de energia, usado para as mais diversas aplicações em processos industriais (Mikkonen, 2020).

Em uma caldeira, diversas grandezas, correlacionadas ou não, são monitoradas para acompanhamento do desempenho do equipamento. Essas grandezas podem tanto orientar a tomada de decisões em tempo real, quando o operador age nos parâmetros que são instantaneamente controláveis, quanto podem ajudar a entender o controle automático da máquina e o comportamento desta quando submetida a diferentes situações (Sousa *et al.*, 2015).

A qualidade físico-química do combustível, as medições próprias do controle da caldeira e as características dos resíduos gerados são variáveis que devem ser corretamente interpretadas para que se extraia a melhor eficiência deste processo (Díez; Cortés; Campo, 2005). O conhecimento dos resultados da queima de determinada biomassa em caldeiras industriais é capaz de orientar tanto as ações diretas no controle da produção de vapor, quanto aquelas ligadas à destinação dos resíduos gerados por esta queima, bem como guiar a decisão do interessado em uma eventual compra deste combustível.

A estatística multivariada usa da matriz de variância-covariância, que é relacionada com a associação entre as variáveis, para demonstrar o comportamento dos dados e permitir interpretações mais simples minuciosas e robustas do fenômeno observado, mostrando relações que são menos perceptíveis quando se observa os dados diretamente (Johnson; Wichern, 1992).

Também uma análise individual das variáveis, por meio de estatística univariada, poderia não revelar variações sutis de comportamento que estivessem desrespeitando as usuais correlações entre elas (Montgomery, 2009).

Desta forma, o presente estudo teve por objetivo encontrar formas de se melhorar o funcionamento da caldeira criando ferramentas (baseadas na aplicação de técnicas de estatística multivariada) de análise de variáveis relacionadas ao processo de geração de vapor em escala industrial, por meio da avaliação de uma caldeira mista a biomassa pertencente a uma empresa fabricante de painéis de madeira reconstituída. Usou-se estatística multivariada para avaliação dos dados, buscando fornecer informações difíceis de serem extraídas por métodos univariados, principalmente pela grande quantidade de variáveis analisadas.

O estudo foi dividido em dois capítulos para separar a abordagem dos gráficos de escores da PCA, que trabalha a exploração dos dados de um ponto de vista que considere sua maior variabilidade, da abordagem feita especificamente pela estatística T^2 de Hotelling, que consiste de uma análise inferencial.

No capítulo 1 foi usada a análise de componentes principais primeiramente para observação dos dados oriundos de ambos os tratamentos (dois diferentes tipos de combustíveis queimados) e, em seguida, a mesma análise foi feita para os tratamentos em separado. Isso permitiu observar as associações entre variáveis e entre variáveis e a distribuição dos escores em ambas as situações.

No capítulo 2, foi criada uma carta de controle com estatística T^2 de Hotelling, as leituras padronizadas das variáveis ao longo do tempo, bem como o índice de participação desta variável na saída de controle. Esse procedimento foi aplicado em cada leitura registrada pelo sistema supervisor da caldeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa trouxe informações pouco exploradas em condições estritamente práticas, aproximando-se dos problemas reais que envolvem a geração de vapor em uma caldeira industrial mista a partir da avaliação do seu funcionamento quando submetida a diferentes combustíveis, fazendo uma exploração dos comportamentos e relações entre suas variáveis de processo e descrevendo, para cada biomassa utilizada, os resultados acumulados de sua produção durante o experimento.

Observando-se as análises físicas e químicas realizadas, os combustíveis diferem principalmente em sua densidade aparente a granel e na quantidade de cinzas, características físicas que refletem na geração de resíduo e em características específicas da queima e alimentação da caldeira. A partir da avaliação das análises estatísticas, pode-se perceber que o processo dispõe de diversas variáveis significativamente correlacionadas, portanto, o uso das técnicas multivariadas empregadas para exploração dos dados é recomendado, já que possibilita uma menor distorção no monitoramento do processo ao diminuir erros inferenciais, que seriam maiores caso análises univariadas fossem aplicadas nas mesmas condições. A carta de controle interativa criada torna a exploração visual mais fácil, mostrando de forma clara as condições em que o processo se encontrava em cada amostragem.

A quantificação da contribuição das variáveis para a extrapolação da estatística T^2 de Hotelling foi capaz de auxiliar o entendimento das possíveis rotas de ação para alcançar uma melhor eficiência ou, até mesmo, para identificação de problemas de operação.

A análise de componentes principais forneceu uma visão global permitindo uma análise do ponto de vista da variação dos dados, focando naqueles que mais têm relevância no processo. Essa análise veio ao encontro de algumas informações levantadas pela quantificação das contribuições das variáveis na extrapolação da estatística T^2 de Hotelling, mas também trouxe novas percepções, que puderam complementar o entendimento do comportamento do processo da caldeira quando exposta a diferentes situações.

No que tange a influência das variáveis analisadas, percebe-se que a gestão da água da caldeira (nível, temperatura, vazão e pressão) está bastante relacionada às saídas de controle do processo. Além disso, a pressão da fornalha foi a variável

que apresentou a maior mudança de comportamento nesse sentido, saindo da posição que menos influencia os problemas de processo quando no uso do cavaco de eucalipto, e passando a ser terceira que mais influenciou nesses problemas quando utilizada a mistura cavaco e casca de eucalipto.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. *et al.* The use of crop residues for biofuel production. **Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy: construction, biomedical, and other industrial applications**. p. 369–395, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-08-102426-3.00016-3.
- ALMEIDA, G. M.; CARDOSO, M.; PARK, S. W. Detecting an abnormality in a recovery boiler using dynamic multivariate data analysis with parallel coordinate plots. **Appita Journal**, v. 65, n. 1, p. 76-78, 2012.
- BORO, M. *et al.* Strategies involved in biofuel production from agro-based lignocellulose biomass. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, n. 102679, p. 1-28, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102679.
- BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 2, p. 132–140, 2017. DOI: 10.17224/energagric.2017v32n2p132-140.
- CHANDRASEKHARAN, S.; PANDA, R. C.; SWAMINATHAN, B. N. Statistical modeling of an integrated boiler for coal fired thermal power plant. **Heliyon**, v. 3, n. 6, p. 1-15, 2017. DOI: 10.1016/j.heliyon.2017.e00322.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.
- COSTA, V. A. F.; TARELHO, L. A. C.; SOBRINHO, A. Mass, energy and exergy analysis of a biomass boiler: A portuguese representative case of the pulp and paper industry. **Applied Thermal Engineering**, v. 152, p. 350–361, 2019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.033.
- CORNETTE, J. F. P. *et al.* Particulate matter emission reduction in small-and medium-scale biomass boilers equipped with flue gas condensers: Field measurements. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, p. 106056, 2021.
- DASHTI, A. *et al.* Estimation of biomass higher heating value (HHV) based on the proximate analysis: Smart modeling and correlation. **Fuel**, v. 257, n. 115931, 2019. DOI:10.1016/j.fuel.2019.115931.
- DÍEZ, L. I.; CORTÉS, C.; CAMPO, A. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 10, p. 1516–1533, 2005. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2004.10.003.
- ELLIOTT, A.; MAHMOOD, T.; KAMAL, A. Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115728, 2022.
- EPE. **Painel PNE**. 2023. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/painel-pne-2050>>. Acesso em: 23. Fev. 2023.
- GARCIA, D. P. *et al.* Assessment of plant biomass for pellet production using

multivariate statistics (PCA and HCA). **Renewable Energy**, v. 139, p. 796- 805, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.103>.

GILLESPIE, G. D. *et al.* Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. **Fuel**, v. 111, p. 771-777, 2013. DOI:10.1016/J.FUEL.2013.05.002.

GREINERT, A.; MRÓWCZYŃSKA, M.; SZEFRNER, W. The use of waste biomass from the wood industry and municipal sources for energy production. **Sustainability**, v. 11, n. 3083, 2019. DOI: 10.3390/su11113083.

HAN, J.; CHOI, Y.; KIM, J. Development of the Process Model and Optimal Drying Conditions of Biomass Power Plants. **ACS Omega**, v. 5, n. 6, p. 2811–2818, 2020. DOI: 10.1021/acsomega.9b03557.

HARDING, N. S.; O'CONNOR, D. C. Ash deposition impacts in the power industry. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 11–12, p. 1082–1093, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.018>.

HARIANA *et al.* A comprehensive evaluation of cofiring biomass with coal and slagging-fouling tendency in pulverized coal-fired boilers. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 14, n. 102001, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102001>.

HENNING, E. *et al.* Application of hotelling's T^2 control chart for a machining process of the inside diameter of a steel cylinder. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 9, n. 2, p. 155-168, 2014. DOI: 10.15675/gepros.v34i2.1015.

INDRAWAN, N. *et al.* Data analytics for leak detection in a subcritical boiler. **Energy**, v. 220, n. 119667, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119667.

KOUSHIK, V. S. V. *et al.* A Review on Alternate Fuels Used In Boilers. **International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)**, v. 4, n. 9, p. 432-437, 2022. DOI: 10.35629/5252-0409432437.

KRÓL, D.; MOTYL, P.; POSKROBKO, S. Chlorine Corrosion in a Low-Power Boiler Fired with Agricultural Biomass. **Energies**, v. 15, n. 382, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010382>.

LOWRY, C. A.; MONTGOMERY, D. C. A review of multivariate control charts. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 27, n. 6, p. 800-810, 1995. DOI: 10.1080/07408179508936797.

MENG, X. *et al.* Effects of preheating primary air and fuel size on the combustion characteristics of blended pinewood and corn straw in a fixed bed. **Energy**, v. 210, p. 118481, 2020.

MIKKONEN, T. **Matrix heat transfer calculation model for back-pass tube bank heat exchangers of fluidized bed steam boilers**. 2020. Tese (Mestrado) – Curso de Sistemas de energia, Lappeenranta-Lahti University of Technology (LUT), Lappeenranta.

MONTGOMERY, D. **Introduction to statistical quality control**. 6. Ed. Arizona: John Wiley & Sons Inc, 2009.

OAKLAND, J.; OAKLAND, J. S. **Statistical process control**. 6. Ed. London: Routledge, 2007.

ØSTERGAARD, P. A. *et al.* Sustainable development using renewable energy technology. **Renewable Energy**, v. 146, p. 2430–2437, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.094.

ØSTERGAARD, P. A.; SPERLING, K. Towards sustainable energy planning and management. **International Journal of Sustainable Energy Planning and Management**, v. 1, p. 1-6, 2014. DOI: 10.5278/ijsepm.2014.1.1.

RAZI, F.; DINCER, I. Renewable energy development and hydrogen economy in MENA region: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 168, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112763.

REINALDO, R. F. *et al.* Caracterização de depósitos de cinzas de caldeira com queima de carvão pulverizado. **Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering-ABCM**, Curitiba, 2006.

RONI, M. S. *et al.* Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 1089–1101, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.023.

SANTOS, R. M.; RODRIGUES, M. S.; CARNIELLO, M. F. Energia e Sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira. **Scientia: Revista Científica Multidisciplinar**, v. 6, n. 1, p. 13–33, 2021.

SUN, R. *et al.* A biomass-coal co-firing based bi-level optimal approach for carbon emission reduction in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123318, 2021.

SILVESTRE, A. **Análise de dados e estatística descritiva**. São Paulo: Escolar editora, 2007.

SONG, B.; VOISEY, K. T.; HUSSAIN, T. High temperature chlorine-induced corrosion of Ni50Cr coating: HVOLF, HVOGF, cold spray and laser cladding. **Surface and Coatings Technology**, v. 337, p. 357–369, 2018. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.01.025.

SHAHA, A. P. *et al.* Performance prediction and interpretation of a refuse plastic fuel fired boiler. **IEEE Access**, v. 8, p. 117467-117482, 2020.

SOUSA, B. M. *et al.* Multivariate statistical process control of boiler and turbine-generator units of a Thermoelectric Power Plant with multiple operating set points. **International Conference on Industrial Technology 2015, Seville, Spain**, p. 1907-1913, 2015. DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125375.

VAN RUIJVEN, B. J.; DE CIAN, E.; SUE WING, I. Amplification of future energy demand growth due to climate change. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-10399-3.

VERSTEEG, P. *et al.* **A Multivariate Analysis of Recovery Boiler Fouling Citation**. 2007 International Chemical Recovery Conference in Quebec. Quebec, 2007.

WICHERN, D.; JOHNSON, R. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6. ed. New Jersey, Pearson, 2007.

WOICIECHOWSKI, A. L. *et al.* Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – Conventional processing and recent advances. **Bioresource technology**, v. 304, n. 122848, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122848.

ZHOU *et al.* The Study of The Combustion Control System of Biomass Boiler pg. 3533 - 3536, **IEEE**, 2019.